

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2005 年 9 月 29 日 (29.09.2005)

PCT

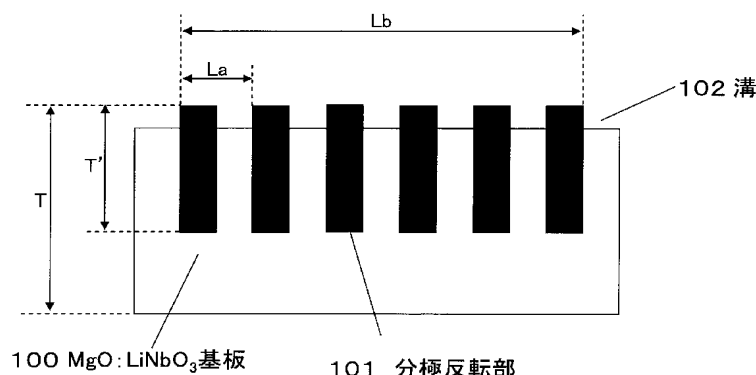
(10) 国際公開番号
WO 2005/091066 A1

- (51) 国際特許分類⁷: G02F 1/37 (74) 代理人: 小野 由己男, 外(ONO, Yukio et al.); 〒5300054 大阪府大阪市北区南森町 1 丁目 4 番 1 9 号 サウスホレストビル 新樹グローバル・アイビー特許業務法人 Osaka (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2005/004520
- (22) 国際出願日: 2005 年 3 月 15 日 (15.03.2005)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願2004-086230 2004 年 3 月 24 日 (24.03.2004) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 松下電器産業株式会社 (MATSUSHITA ELECTRIC INDUSTRIAL CO., LTD.) [JP/JP]; 〒5718501 大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 Osaka (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 森川 顕洋 (MORIKAWA, Akihiro). 杉田 知也 (SUGITA, Tomoya). 水内 公典 (MIZUUCHI, Kiminori).
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE,

[続葉有]

(54) Title: OPTICAL DEVICE AND METHOD FOR FORMING POLARIZATION-REVERSED REGION

(54) 発明の名称: 光学素子ならびに分極反転領域の形成方法

100... MgO:LiNbO₃ SUBSTRATE

101... POLARIZATION-REVERSED REGION

102... GROOVE

(57) Abstract: Disclosed is a stable optical device having uniform and wide-ranging fine polarization-reversed structures in a ferroelectric crystal. The optical device comprises a plurality of polarization-reversed regions (101) formed in an MgO:LiNbO₃ substrate (100) and grooves (102) formed in the substrate surface between the polarization-reversed regions (101). The depth (T') of almost every polarization-reversed region (101) relative to the thickness (T) of the substrate satisfies the following relation: T' < T.

(57) 要約: 強誘電体結晶において、均一かつ広範囲な微細分極反転構造を有する安定な光学素子を提供する。MgO:LiNbO₃基板(100)に形成された複数の分極反転領域(101)と、分極反転部101の間の基板表面に形成された溝(102)とを備え、分極反転部(101)のほぼ全体の深さT'が基板厚みTに対し、T' < Tの関係を満たす。



WO 2005/091066 A1



BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR),
OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML,
MR, NE, SN, TD, TG).

2文字コード及び他の略語については、定期発行される
各*PCT*ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語
のガイダンスノート」を参照。

添付公開書類:

— 国際調査報告書

明 細 書

光学素子ならびに分極反転領域の形成方法

技術分野

[0001] 本発明は、光学素子、特に、分極反転領域を備える光学素子に関する。また、別の本発明は、分極反転領域の形成方法に関する。

背景技術

[0002] 強誘電体の分極を強制的に反転させる分極反転現象を利用すると、強誘電体の内部に周期的な分極反転領域(分極反転構造)を形成することができる。このようにして形成された分極反転領域は、表面弾性波を利用した光周波数変調器や、非線形分極の分極反転を利用した光波長変換素子、プリズム形状やレンズ形状の反転構造を利用した光偏光器などに利用される。特に、非線形光学物質の非線形分極を周期的に反転することが可能になれば、非常に変換効率の高い光波長変換素子を作製することができる。これを用いて半導体レーザなどの光を変換すれば、印刷、光情報処理、光応用計測制御分野などに応用できる小型の短波長光源を実現することができる。

周期状の分極反転領域を形成する従来の方法としては、Ti熱拡散による方法、SiO₂を装荷した後に熱処理する方法、プロトン交換処理と熱処理とを行う方法等が報告されている。一方、強誘電体の自発分極が電界により反転することを利用して周期状の分極反転領域を形成する方法も報告されている。この電界を利用する方法としては、例えば、C軸に沿って切り出された基板の-C面に電子ビームを照射する方法や、+C面に正イオンを照射する方法がある。いずれの場合でも、照射された荷電粒子により形成される電界により、数100 μ mの深い分極反転領域が形成される。

他の従来の方極反転領域の製造方法としては、LiNbO₃基板に櫛形電極を形成して、これにパルス状の電界を印加する方法が報告されている(例えば、特許文献1、特許文献2参照。)。これらの方法では、LiNbO₃基板の+C面に周期状の櫛形電極を形成し、-C面に平面電極を形成する。次に、+C面を接地し、-C面にパルス電源によってパルス幅が典型的には100 μ sのパルス電圧を印加して、基板にパルス電

界を印加する。分極を反転させるために必要な電界は、約20kV/mm以上である。そのような値の電界を印加する際に、基板が厚いと電界印加によって基板が破壊される可能性がある。しかし、基板の厚みを200 μ m程度にすることで、電界印加による結晶破壊を回避することが可能になり、室温での分極反転領域の形成が可能になる。基板を貫通する深い分極反転構造が得られている。

また、Z板のMgドープLiNbO₃基板(以下MgLNとする)に櫛形電極を形成し、これに電圧を印加することで周期状の分極反転構造の形成が可能なが開示されている(例えば、特許文献3参照。)

さらに、光波長変換素子の高効率化を実現するには、周期が3〜4 μ mである短周期の分極反転構造が必要になる。電界印加によって分極反転領域を形成すると、電極直下の分極が反転した後に、基板の表面に平行な方向に分極反転領域が広がる。このため、分極反転構造の短周期化が困難になる。この問題を解決するために、従来の方法では、パルス幅が100 μ s程度である短時間パルス電圧を電極に印加することによって電圧印加時間を短縮して、短周期の分極反転構造を形成している。

他の短周期の分極反転領域の形成方法としては、Z板のLiTaO₃基板の表面に溝を形成し、分極反転の幅方向の拡大を抑制することで周期3.8 μ mの分極反転領域を形成する方法が知られている(例えば、特許文献4参照)。

さらに、短周期分極反転領域の形成方法として、誘電体材料内に分極反転微小構造を形成するために、複数の領域に分割して別々に分極反転領域を形成することで、例えば、周期4 μ mの短周期分極反転形成する方法が知られている(例えば、特許文献5参照。)

また、MgLNに短周期の分極反転構造を形成する方法も提案されている(例えば、特許文献6参照。)。この方法では、Z板のMgLNに周期状分極反転構造を形成する。詳しくは、この方法では、MgLNの+Z面に櫛形電極を形成し、裏面からコロナを照射することで周期状の分極反転構造を形成している。これにより、周期が4 μ mで基板厚み0.5mmに貫通する分極反転構造が形成されている。

また、Z板のMgLNの-Z面と電極の間にSiO₂膜を挟み込むことにより、基板の破壊を防ぎ、周期5 μ mで基板厚み0.3mmを貫通する分極反転構造を形成する方法

について知られている(例えば、特許文献7参照。)

また、オフカットのMgLNに分極反転構造を形成する方法も提案されている(特許文献8参照)。この方法では、オフカットの基板に電極を形成し、これに電圧を印加することで針状の分極反転構造を形成できる。分極反転構造は結晶の分極方向に成長する。オフカットMgLN基板には周期 $5\mu\text{m}$ 程度の分極反転構造が形成できる。分極方向を基板表面からわずかに傾けたオフカット基板を用い、基板の内部に針状の分極反転形状を形成している。

特許文献1:特開平3-121428号公報

特許文献2:特開平4-19719号公報

特許文献3:特開2001-66652号公報

特許文献4:特開2000-147584号公報

特許文献5:特開2003-307758号公報

特許文献6:特開平6-242478号公報

特許文献7:特開平7-281224号公報

特許文献8:特開平9-218431号公報

発明の開示

[0003] (発明が解決しようとする課題)

従来技術では、Z板の $\text{MgドープLiTa}_{(1-x)}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 基板における微細かつ安定な分極反転領域の形成が難しいという課題がある。

例えば、従来技術では、オフカット基板においては、電界印加により分極反転の形成を行うことが可能である。しかしながら、Z板基板においては、コロナポーリング等の複雑な電解印加方法を行わない限り、均一な微細反転構造の形成を行うことが難しい。ここで、コロナポーリングとは、荷電粒子を基板に堆積させて電界を発生し、これによって分極を反転させる方法である。この方法では、荷電粒子による電界の大きさに限界があるため、分極反転が形成できる基板の厚みが 0.5mm 程度に限られており、 1mm を越えるような厚い基板への分極反転形成が困難である。

以上のように、電極によって電圧を印加する方法は、オフカット基板への反転形成には有効であるが、Z板への分極反転の形成が難しいという課題がある。

これに対し、櫛形電極をZ板のMgLNに形成し、これに電圧を印加することで周期状の分極反転構造を形成する方法が知られている。この従来技術は、周期状の分極反転構造が均一に形成できるという特長をもっている。しかしながら、この従来技術により形成される分極反転は、電極先端の一部に限られている。このため、電極下の広い範囲で分極反転構造を形成することは、依然困難である。

そこで、本発明の目的は、短周期かつ広範囲の分極反転領域を備える光学素子を提供すること、および短周期かつ広範囲の分極反転領域を形成する方法を提供することを課題とする。

(課題を解決するための手段)

本発明に関わる光学素子は、単一分極化された強誘電体基板と、強誘電体基板に形成された複数の分極反転領域と、分極反転領域の間の強誘電体基板の表面に形成された溝とを備えている。少なくとも1つの分極反転領域の深さ T' は、基板厚み T に対し、 $T' < T$ の関係を満たすことを特徴とし、これによって上記目的が達成される。

さらに、本発明に関わる分極反転領域の形成方法は、単一分極化された強誘電体結晶基板の内部に分極反転領域を形成する方法において、強誘電体基板の表面に溝を設け、強誘電体基板の表面を複数の領域に分割する工程と、複数の領域に電界を印加する工程を備えている。電界の方向は、強誘電体基板の自発分極に対向する方向である。電界を印加する工程において、複数の領域に電位差が生じることを特徴とする。

(発明の効果)

本発明の光学素子では、分極反転領域の間に溝が形成されている。さらに、少なくとも1つの分極反転領域は、基板を貫通していない。以上の構成により、短周期かつ広範囲の分極反転領域を備える光学素子を提供することが可能となる。すなわち、基板を貫通しない分極反転領域を有しつつ、さらに溝を有するため、例えば、分極反転領域の形成工程における電界印加を適切に行うことが可能となる。このため、微細な(短周期の)分極反転領域を形成する場合であっても、均一かつ広範囲に分極反転領域の形成を行うことが可能となる。

また、本発明の分極反転領域の形成方法は、溝により分割された複数の領域に分

極反転領域を形成する。さらに、電界の方向は、強誘電体基板の自発分極に対向する方向であり、電界を印加する工程において、複数の領域には電位差が生じる。以上の構成により、短周期かつ広範囲の分極反転領域を形成することが可能となる。すなわち、以上の構成により、分極反転領域の形成工程における電界印加を適切に行うことが可能となる。このため、微細な(短周期の)分極反転領域を形成する場合であっても、均一かつ広範囲に分極反転領域の形成を行うことが可能となる。

また付随的な効果として、この方法を用いることで、紫外光発生用の光波長変換素子等の光学素子の製造が可能となる。

図面の簡単な説明

[0004] [図1]本発明の光学素子の断面図

[図2]本発明の光学素子の斜視図

[図3]実施の形態2の分極反転領域の形成方法を示す図で、(a)上面図(b)側面図

[図4]実施の形態2の分極反転領域の形成方法を示す断面図

[図5]実施の形態2の分極反転領域の形成方法において、(a)電位差が異なる場合の電界分布図(b) L_1 が大きい時の電界分布図(c) L_1 が小さい時の電界分布図

[図6]実施の形態2の分極反転領域の形成方法において、(a)溝が無い場合の電界分布図(b)溝がある場合の電界分布図

[図7]実施の形態2の分極反転領域の形成方法において、電界の変化を利用して電極間に異なる電位差を発生させる構成図

[図8]実施の形態2の分極反転領域の形成方法において、(a)負電圧印加の構成図(b)正負電圧印加の構成図

[図9]実施の形態2における絶縁溶液の温度と、分極反転領域の長さ L_r との関係を示す図

[図10]実施の形態3の分極反転領域の形成方法を示す図で、(a)上面図(b)側面図

符号の説明

[0005] 100, 301, 401, 500, 1001 MgO:LiNbO₃基板

101, 200, 405, 504 分極反転部

102, 402 溝

302, 1002	主面
303, 501, 601, 700, 800, 1003	第一の電極
304, 502, 602, 701, 801, 1004	第二の電極
305, 1005	第一の電極の先端部
306, 1006	第二の電極の先端部
307, 503, 603, 702, 802, 1007	第三の電極
308, 404, 703, 1008	パルスジェネレータ
400	Ta膜
403	SiO ₂ 膜
V ₁ , V ₂ , V ₃	電位
E _x	X方向の電界成分
E _z	Z方向の電界成分
P _s	自発分極
A	電界
L1	第一の電極と第二の電極との間の距離
L _r	分極反転領域の長さ
T	基板温度

発明を実施するための最良の形態

[0006] 本発明の実施の形態を説明する前に、まず、強誘電体の分極反転について説明する。

強誘電体は、自発分極による電荷の偏りを結晶内に有している。自発分極に対向する電界を印加することにより、強誘電体における自発分極の方向を変えることができる。

自発分極の方向は、結晶(材料)の種類により異なる。LiTaO₃、LiNbO₃等、またはその混晶であるLiTa_(1-x)Nb_xO₃ (0 ≤ x ≤ 1) 基板の結晶は、C軸方向のみに自発分極を有する。このため、これらの結晶では、分極は、C軸に沿った+方向あるいはその逆向きの一方向の2通りしか存在しない。電界を印加することで、これらの結晶の分極は、180度回転して、それまでとは逆の方向を向くようになる。この現象を、分極反転

という。分極反転を生じさせるために必要な電界を反転電界と称し、 LiNbO_3 、 LiTaO_3 等の結晶では、室温で約20kV/mm程度、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ で約5kV/mm程度の電界が必要である。

強誘電体において、単一の分極方向を持った結晶にすることを「分極の単分域化」と称する。この分極の単分域化を達成するために、結晶成長後に高温中で電界を印加する方法が一般に行われている。

(実施の形態1)

本実施の形態では、周期分極反転構造を強誘電体結晶内部に有した光学素子として、波長変換素子について述べる。

図1は、本発明の光学素子の断面図である。Z板のMgLN基板100に、周期状の分極反転部101が形成されている。基板の厚みは、1mm、分極反転の深さは、約0.5mm程度である。分極反転は、基板結晶のY軸(図1では、断面に対して垂直方向)に沿って形成されている。分極反転部101は、基板の+Z面から-Z面側(図1では、断面上で、分極反転の配列方向に直交する方向)に向かって形成されている。分極反転部101は、基板の厚みより短くなるように形成されている。より詳しくは、分極反転部101の深さ T' は、基板厚み T よりも短くなるように形成されている。ここで、分極反転部101の深さ T' とは、分極反転部101の基板厚さ方向の長さを意味し、基板厚み T とは、分極反転部101の+Z面側の端部から-Z面までの長さを意味する。すなわち、分極反転部101は、基板を貫通しないように形成されている。また、周期状の分極反転部101の付近には、MgLNの+Z面表面に深さ $0.5\mu\text{m}$ の溝102が形成されている。ここでの分極反転周期 La (隣接する2つの分極反転領域の同位置の配列方向間隔、例えば、それぞれの分極反転領域の配列方向一侧同士の間隔)、分極反転領域長 Lb (全ての分極反転領域の配列方向一侧から他側への長さ)は、それぞれ $4\mu\text{m}$ 、10mmである。

図2は、図1に示した光学素子の構成斜視図である。この光学素子は、波長 λ の基本波を周期状の分極反転構造で波長変換して波長 $\lambda/2$ の高調波に変換する。ここでは、分極反転周期 La を $4\mu\text{m}$ として形成することで、波長900nmの光を波長450nmの光に波長変換している。また、分極反転領域長 Lb の部分に、レンズで900nm

の光を入射したところ、変換効率5%/Wで波長変換され、450nmの高調波が得られた。

このように、本発明では、均一な分極反転領域を形成することで高効率の波長変換が可能となった。さらに、基板厚みが1mm以上あることで、基本波、高調波のビームウエストを大きくとれる。このため、光のパワー密度を低減でき、高出力な出力特性が実現できた。0.5mmの基板に形成した場合に比べ1mm厚の基板を利用することで出力を4倍に高めることが可能となった。

また、本発明では、分極反転をY軸方向に形成することで、均一で短周期の分極反転構造を形成することが可能となった。具体的には、周期 $2\mu\text{m}$ 以下の分極反転構造の形成が可能となり、波長400nm以下の紫外光発生が可能となった。従来技術では、分極反転をX軸方向に形成した場合、短周期の分極反転構造の形成が困難になるため、波長500nm以上の光しか得られなかった。しかし、本発明では、Y軸方向にすることで、短波長光の発生が可能となった。

なお、図1では全ての分極反転部101が基板を貫通しない構成について示したが、必ずしもこのような構造に限定されない。例えば、分極反転の深さを基板の厚みより浅く形成し、表面から裏面に貫通する分極反転領域の割合を全体の分極反転領域の半分(50%)以下に抑えることができれば、均一な分極反転構造の形成に有効である。さらには、この割合を10%以下に抑えることで、より均一な分極反転構造の形成が可能となった。特に、貫通する分極反転領域の割合が5%以下になるとさらに均一性が向上した。本発明では、分極反転領域の深さ方向の長さを制限することにより、分極反転周期 $2\mu\text{m}$ 以下、波長400nm以下の紫外光発生が可能となった。

ところで、従来技術では、周期状の分極反転構造を形成した場合、分極反転領域の境界では異なる自発分極が隣接し、結晶的に歪みの大きな分極壁を形成する。このため、従来技術では、分極反転構造が微細化するに伴い、結晶内の歪みが大きくなる。一般に、分極壁における歪みは分極反転領域の不安定性の原因となる。そこで、前述したように貫通しない分極反転領域を利用すると、均一な分極反転構造の形成が可能であるが、その一方で貫通しない分極反転領域の安定性は、貫通した分極反転領域に比べて大幅に特性が劣ることが明らかになった。例えば、形成された

分極反転領域に400nm以下の紫外光を照射した場合や、急激な温度変化を与えた場合や、また外部電界を与えた場合に、分極反転領域が一部消滅する現象が観測された。このため、ヒートショックや高出力の紫外光発生において、特性が劣化する現象がみられた。このような現象は、特に微細な分極反転形状において顕著であり、分極反転領域または特に基板表面から発生するため、これを防止する方法を種々検討した。この結果、本発明のように、分極反転領域間に溝を形成し、分極反転部分と非分極反転部分とに段差を設けることで安定性が大幅に向上することが明らかになった。溝の深さとしては、本実施の形態のように0.5 μm 以上が好ましかった。一方、0.2 μm 以下では、ほとんど効果がなかった。溝は、深いほど効果が高いが、0.5 μm 以上の深さであれば、 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ のヒートサイクル試験を100回行っても特性の変化は観測されなかった。このため、本発明のように、0.5 μm 以上の溝を分極反転領域間の基板表面に設けることは分極反転構造の信頼性向上に有効である。

従来技術では、微細な分極反転領域を形成した場合に分極壁に歪みが残る。この歪みにより分極壁に屈折率分布が形成される。周期状に分極反転領域を形成すると、分極壁に屈折率分布が生じるため、周期的な屈折率分布が形成される。例えば、分極反転構造を光学素子に利用する場合、周期的な屈折率変化は、分極反転構造を伝搬する光の波面を乱し、かつ散乱損失を増大させる原因となる。これに対して、本実施の形態のように分極反転領域間に溝を設けることで分極壁の屈折率分布が低減されることが見出された。溝の深さとしては、1 μm 以上にすることで光学損失の小さな光学素子の形成が可能となった。

また、本発明の光学素子では、溝を形成することにより分極反転の周期方向の過剰な成長を抑制することが可能となった。従来、分極反転の深さ方向(Z軸方向)、および周期と直交する方向(Y軸方向)に長い分極反転を形成する場合、分極反転の周期方向(X軸方向)の広がりが過剰になり、広範囲での分極反転領域の形成が困難であった。一方、本発明のように溝を形成することで、周期方向の分極反転の過剰成長を抑制し、短周期(特に周期2 μm 以下)でも広範囲でかつ均一な周期状の分極反転領域を形成することができた。このため、本発明の光学素子は、分極反転領域、特に周期2 μm 以下の分極反転領域を均一かつ広範囲に作製しやすいという効果

を有しており、作製の観点においても実用的である。

なお、分極反転構造を利用した光学素子として光波長変換素子を例にあげて説明したが、分極反転構造をプリズム形状やグレーティング形状に形成することで、偏光器が構成できる。この偏光器は、例えば、位相シフト、光変調器、レンズ、等に応用できる。また、分極反転領域に電圧を印加することで電気光学効果を利用した屈折率変化を形成できる。このため、これを利用した光学素子可以实现できる。例えば、電界により屈折率変化を制御できるため、屈折率変化を形成した光学素子は、スイッチ、偏光器、変調器、位相シフタ、ビーム整形等に応用できる。本発明の分極反転領域の形成方法は、微細な分極反転形状の形成を可能とするため、これらの光学素子の高性能化を可能にする。

なお、基板の厚みは、0.5mm以上が好ましい。基板が0.5mm以上であれば、分極反転部の表面から裏面への貫通が防止できる。基板の厚みが1mm以上になると、さらに、分極反転の貫通が防止できる。このためより均一な分極反転領域の形成が可能である。一方、厚い基板においては、分極反転領域が貫通しないため、分極反転領域の不安定性により信頼性が劣化する。本発明では、これを防止するために分極反転領域間に溝を設けており、この溝は、分極反転領域の安定性に対して有効となる。

なお、以上の本実施の形態の説明では、強誘電体基板としてZ板のMgOドープLiNbO₃基板を用いている。あるいは、その他に、MgOドープLiTaO₃基板、NdドープLiNbO₃基板、KTP基板、KNbO₃基板、NdとMgOとをドープしたLiNbO₃基板、あるいはNdとMgOとをドープしたLiTaO₃基板、ストイキオ組成の同様の基板などであってもよい。また、Z板に限らず、X板、Y板であっても同様の効果が得られる。

このうち、Ndをドープした結晶からなる基板はレーザ発振が可能であるので、レーザ発振による基本波の発生とその波長変換による第2高調波の発生とが同時に行える。そのため、高効率で安定した動作特性を有する短波長光源が構成できた。

(実施の形態2)

本実施の形態では、1mm厚のZ板MgLNを用いて分極反転領域を形成する方法について説明する。本実施の形態で説明する分極反転領域の形成方法は、Z軸に

垂直な主面を有するMgLN基板の+Z面に、独立した二つの電極の電極指を交互に配置し、それぞれの電極に電圧を印加することで、広範囲の分極反転領域を形成する方法である。

本実施の形態の分極反転領域の形成方法について説明する。本実施の形態では、周期 $4\mu\text{m}$ の分極反転領域を形成する方法について述べる。

まず、図3に示すように、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 基板301の主面302には、Y軸方向に延びる複数の先端部(電極指)305を有する第一の電極303(周期 $8\mu\text{m}$ の歯(電極指))を有する櫛形電極と、Y軸方向に延びる複数の先端部(電極指)306を有する第二の電極304(周期 $8\mu\text{m}$ の歯(電極指))を有する櫛形電極とが形成されている。また、先端部305および先端部306は、同一平面内において、X軸方向(図2参照)に周期電極を形成している。具体的には、第一の電極303の先端部305は、第二の電極304の先端部306と、Y軸方向位置が重複するように、交互に配置されている。すなわち、それぞれの先端部は、X軸方向から見て重複するように交互に配置されている。これにより、先端部305および先端部306は、同一平面内において、X軸方向に周期 $4\mu\text{m}$ の周期電極を形成している。また、第一の電極303の先端部305、および第二の電極304の先端部306は、結晶のY軸方向を向いている。さらに、第一の電極303と第二の電極304とは電氣的に絶縁されている。また、主面302の反対側の面に第三の電極307が形成される。第一の電極303または第二の電極304と他の面に形成された第三の電極307との間にパルスジェネレータ308で制御した電圧を印加することで、電極間に分極反転領域が形成される。

これらの電極303および304の形成方法について、図4を用いて説明する。

これらの電極303および304は、例えば、厚さ 100nm のTa膜400で形成される。第一の電極303と第二の電極304との周期電極形成は、Ta膜上にレジストを堆積し、レジストをパターニングすることで CF_4 ガス雰囲気中の反応性イオンエッチングにより行われる(図4(a)参照)。また、同様の手順により、主面302の反対側の面の少なくとも電極303および304に対応する部分、あるいは全面において、第三の電極307(図3(b)参照)が形成される。第三の電極307も、電極303および304と同様に、Ta膜400で形成される。

次に、 CHF_3 ガス雰囲気中の反応性イオンエッチングにより、電極で覆われていないMgLN基板401の表面をエッチングする(図4(b)参照)。その後、レジストを除去することで、MgLN基板401の表面に溝402が形成される。ここでのエッチングによる溝深さは、 $0.1\ \mu\text{m}$ である。

さらに、溝402が形成された表面に SiO_2 膜403を絶縁膜として形成する(図4(c)参照)。

Ta膜400で形成された電極間にパルスジェネレータ404で制御した電圧を印加することで、電極間に分極反転部405が形成される(図4(d)参照)。このパルスジェネレータ303は、所定の電圧レベルを有し、必要に応じてパルス電圧または直流電圧を、MgLN基板301に印加することができる。

ここで、電圧印加時の放電発生を避けるために、MgLN基板301を絶縁液または真空中(10^{-6} Torr以下)に配置して、電圧を印加する。

電圧の印加方法について具体的に説明する。

まず、第二の電極304と第三の電極307との間にパルス電圧を印加する。次に、第一の電極303と第三の電極307との間に、同様にパルス電圧を印加する。これらにより、第一の電極303および第二の電極304の先端部305および先端部306の下に分極反転核が生じ、先端部305と先端部306とが配置される周期に対応して、それぞれ周期 $8\ \mu\text{m}$ の分極反転領域が形成される。先端部305、306の分極反転核は、パルス電圧の印加を継続することによりY軸方向およびZ軸方向に成長する。Y軸方向において、第一の電極303と第二の電極304とが重複する部分全体に分極反転領域が形成されることで、広範囲の周期 $4\ \mu\text{m}$ の分極反転領域が形成される。

次に、本発明の分極反転構造の形成方法の原理について説明する。

本発明の分極反転領域の形成方法は、特に金属添加物を有する強誘電体結晶に対して有効である。使用したのはMgをドーピングした LiNbO_3 (以下MgLNとする)であるが、金属を1mol%以上の高濃度に添加した結晶では、同様の効果が発生する場合が多い。MgLNにおいて、電界印加による分極反転を行うと、形成された分極反転領域の抵抗が3桁以上大幅に低下する現象が観測された。このため、Z板のMgLNの表面と裏面に電極を形成し、電極間に電圧を印加することで、基板表面から裏

面方向に分極反転部を成長させる方法では、一部の分極反転が裏面近傍に到達した時点で、電極間に大きな電流が流れはじめ、電極間の電圧降下が生じ、分極反転を大面積に形成するのが難しくなる現象が見いだされた。つまり、同じ電位の場合、分極反転部が裏面方向に近づくと、電極間の抵抗が大幅に低下することで、電極間の電圧降下が発生し、分極反転の成長が停止する。

これを防止するため、本発明では、結晶表面の電極を複数の領域に分割し、表面電極間に電位差を設ける方法を提案する。すなわち、本発明では、少なくとも何れかの領域に異なる電位差が生じる。

図5(a)に示すように第一の電極501(電位 V_1)と第二の電極502(電位 V_2)との間に電位差 $V_1 - V_2$ を設けると、第一の電極501と第二の電極502との間に電界Aが発生する。電界AのZ方向のベクトル成分 E_z により、第二の電極502の下に自発分極に対向する電界が形成される。第一の電極501と第二の電極502との間は、分極反転が成長する分極方向に直交している。このため、分極反転による電極間の抵抗低下が避けられ、効率的に電界印加が可能となる。この結果、広い領域に渡り、均一な分極反転構造の形成が可能となる。基板表面に異なる電位を有する領域を形成することで、領域間に電界が生じ、この電界のベクトル成分 E_z を自発分極に対向させることで分極反転形成が可能となる。

ところが、図5(b)のように、電極間隔 L_1 が大きな場合には、上記方法により均一な分極反転構造の形成が可能となるが、図5(c)のように、電極間隔 L_1 が小さい場合には、電極間の電界Aは、図に示すようになり、電界Aが電極間にほぼ水平に分布するため、Z方向のベクトル成分 E_z が十分大きくならない。一方、ベクトル成分 E_z を大きくするために、電極間の電圧を増大させると、近接した電極間の絶縁が破壊するという問題が発生する。このため、電極間隔が $5\mu\text{m}$ 以下になると表面電極間の電位差による分極反転が極端に難しくなるという問題が発生する。

一方、本発明では、電極構造を図6(b)に示す構造とし、この問題を解決する。すなわち、第一の電極601と第二の電極602との間に溝を掘ることで、電極間に絶縁性の高い領域を形成する。これによって、第二の電極602から第一の電極601に向かう電界を、図6(b)に示すように、溝の下をくぐるような向きに発生させることが可能とな

る。溝を設けない図6(a)に比べて、溝を設けた図6(b)の構成では、電界成分 E_z を大幅に増大できる。また、第一の電極601と第二の電極602との間の絶縁性を高めることが可能となり、電極間に大きな電圧を印加できる。このため、より均一な分極反転構造の形成も可能となった。また、電極間に設けた溝に絶縁性の高い絶縁液、高真空雰囲気などを使用することで、より高電圧の印加が可能となる。本構成では、電極間隔 $5\mu\text{m}$ 以下の微細な領域でも分極反転領域の形成が可能となった。電極間の溝の深さを深くすると、電極間の絶縁性と、電界ベクトル E_z の増大とが図れ、より均一で深い分極反転構造の形成が可能となる。溝の深さは、最低でも $0.1\mu\text{m}$ 以上が好ましく、 $0.5\mu\text{m}$ 以上であれば、均一性、形成範囲の観点でより効果的であった。

電極の間に溝を形成することにより、上述した効果に加え、さらに別の効果を得ることが可能となり、より微細な分極反転構造の形成が可能となる。

すなわち、電界印加により分極反転領域を形成する場合、分極反転領域は、分極方向に成長すると同時に、分極に垂直な方向にも成長する。この分極に垂直な方向への分極反転領域の成長を側面成長という。この側面成長によって、電極の幅方向に分極反転部が成長する。このため、微細な電極形状により分極反転を形成しても、分極反転領域が側面方向に成長してしまい、横に広がった形状となる。この側面への広がり、数 μm にも達し、 $1\mu\text{m}$ 程度の微細な構造の形成を困難にしている。

これに対し、本発明では、電極の側面部に溝を形成する。これにより、分極反転領域の側面成長が抑圧出来ることを見出された。分極反転領域は、電極直下に発生する分極反転核から成長する。一般に、分極反転領域の側面成長は、電極周辺に発生する電界成分による分極反転核の発生が原因と考えられる。これに対して、本発明では、電極の周辺部に溝を設けることで、電極周辺部での分極反転核発生を抑圧し、側面成長を抑えることが可能となった。この結果、例えば、 $5\mu\text{m}$ 以下の微細な幅の分極反転領域の形成が均一に行えるようになった。さらに、 $1\mu\text{m}$ 以下のサブミクロンオーダーの幅の分極反転領域も容易に形成できるようになった。

なお、本発明の分極反転領域の形成方法として、表面電極に、異なる電圧を印加すると説明したが、電界の変化を利用して電極間に異なる電位差を発生することも可能である。

例えば、図7に示すように、第一の電極701と第三の電極702との間に電界を印加すると、電極構造は、電極間に挟まれたコンデンサーとなる。このため、電極間に電荷が蓄積される過渡的な状態において、第一の電極700は、浮遊電極となり第一の電極700と第二の電極701との間に電界が発生する。この様な電界の変化を利用して第一の電極700と第二の電極701との間に電界分布が発生させることができる。例えば、過渡的に発生する電界は、電圧の変化量に依存する。このため、高速な電圧の変化により第一の電極700と第二の電極701との間に大きな電界が発生させることが可能となる。電極構造にも依存するが、具体的には、電圧の変化量を100V/秒以上にすることで、分極反転の形成が可能となる。さらに、電圧の変化量を1kV/秒以上にすることで、より均一な分極反転形成が可能となる。また、第一の電極700と第二の電極701とに交互に電界を印加することで、両方の電極下に分極反転領域を成長させることも可能となる。

次に、印加する電圧波形について述べる。

電極に印加する電圧波形としては、通常、自発分極に対向する電界を発生する電圧が望まれる。例えば、図8(a)に示すように、第二の電極801と第三の電極802との間には、電界が+Z板の分極方向 P_s に対向するように、第三の電極802に負電圧を印加する。ここで、+方向の電界を印加すると、形成した分極反転が再反転する。特に LiNbO_3 や LiTaO_3 では、分極反転直後は内部電界の存在により分極反転領域の安定性が極端に低下するため、逆方向電圧の印加は避けなければならない。

これに対して、Mgドープの LiNbO_3 は、従来の特性と異なることを見いだした。すなわち、図8(b)に示すように、印加する電圧として正、負電圧を交互に印加する電圧波形であっても、分極反転が均一に形成出来ることを見いだした。この原因は明らかでないが、逆方向の電圧を印加することで電気抵抗が高まることにより、分極反転領域が低抵抗化して分極反転領域の成長が止まることが防止されるとともに、さらに分極反転領域を成長させる役割を果たす。また、自発分極に対向する電界を一方向的に印加すると、基板表面がチャージアップして放電が生じ、不均一な分極反転が形成されるが、正負の電界を印加することで、表面チャージアップによる放電を防止し、均一な反転形成を可能にする。なお、印加条件としては、正負同電界または、自発分

極に対向する電圧に対して、逆電圧は小さい方が好ましい。また、印加電界は、特にパルス幅 $\tau \leq 10\text{msec}$ のパルス印加が好ましかった。複数のパルス列を印加することで、均一な分極反転構造の形成が可能となる。

なお、本発明の分極反転領域の形成方法として、金属電極による電界印加について説明したが、電界印加の方法はこれに限られるものではない。例えば、分極反転に利用されている液体電極、ゾルゲル電極、コロナ放電等による電界印加法を用いても同様の効果が得られる。

なお、本発明の実施の形態においては、Z板の基板を用いたが、これに限られるものではない。例えば、自発分極の方向と基板の法線とが平行なZ板以外に、自発分極の方向と法線とが角度 θ を有するオフカット基板を利用すること可能である。角度 θ の値は、 $\pm 30^\circ$ 以下が望ましい。この場合には、均一で深い分極反転構造の形成が可能となった。特に、角度 θ が $\pm 5^\circ$ 以下であれば、均一性がさらに向上し、効率の高い光学素子が得られた。

なお、本実施の形態では、分極反転領域の周期方向と基板のY軸とが直交するように分極反転領域を形成した。分極反転領域の周期方向とY軸とが直交することで、均一で短周期の分極反転構造を形成することが可能となった。特に、周期 $2\mu\text{m}$ 以下の分極反転構造の均一な形成が可能となった。分極反転領域の周期方向とX軸とが直交するように分極反転領域を形成する場合、短周期の分極反転構造の形成が困難であった。

なお、本実施の形態では、1mm厚の基板を用いたが、基板の厚みは0.5mm以上が好ましい。基板が0.5mm以上になると分極反転部の表面から裏面への貫通が防止でき、分極反転部の抵抗低下を抑制することができる。1mm以上になると、さらに、分極反転の貫通が防止できるためより均一な分極反転領域の形成が可能である。

なお、本実施の形態では電極に印加する電荷量についても検討をおこなった。第一の電極601および第二の電極602(図6参照)の下における分極反転領域を拡大するためには、過剰な電荷量を与えることが有効であった。自発分極を P_s 、分極反転面積を A とすると、適正電荷量 C は、 $C = 2P_s \times A$ である。本発明では、適正電荷

量Cの100倍以上の電荷量を印加することで、Z軸方向(基板厚み方向)、Y軸方向(周期と直行する方向)の分極反転領域が拡大した。

なお、本実施の形態では、電界印加時の絶縁破壊防止のため、絶縁溶液中での電界印加を行っても良いと説明した。

図9は、絶縁溶液の温度と分極反転領域の長さ L_r との関係を示した図である。図9により、80℃付近から反転領域の増大が確認され、100℃以上の温度で反転領域の長さ L_r が飽和していることがわかる。これは、MgLN基板の温度が上昇することで、反転電界が減少し、分極反転が成長しやすくなるためと考えられる。また、150℃以上では周期方向の分極反転成長が著しくなり、短周期(5 μ m以下)の均一な周期分極反転構造形成が困難となった。このため、短周期分極反転の形成には、絶縁溶液の温度は、150℃以下であることが好ましい。

Mgドープ $\text{LiTa}_{(1-x)}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) 基板では、分極反転電界は、通常のLNの1/4以下である。通常のLN等では、基板を厚くした場合に、印加電圧による絶縁破壊が生じる。一方、本発明の構成では、分極反転電界が低い分、絶縁破壊を起こすことなく電圧の印加が可能となった。

なお、本発明の分極反転の形成方法について、Z板のMgLNを用いて説明を行った。Z板基板は、結晶のC軸が基板に垂直な方向にあるため、電気光学効果を利用する電界印加が効率良く行える。また、分極反転深さが深くなる等の有利な点を持っているため、バルク型の光学素子としては理想的な基板である。また、本発明の分極反転の形成方法は、X板、Y板の基板のMgLNにおいても適用できる。

(実施の形態3)

本実施の形態では、1mm厚のZ板MgLNを用いて分極反転領域を形成する方法について説明する。さらに、本実施の形態では、この分極反転領域の形成方法により形成された光学素子について説明する。

本実施の形態で説明する分極反転領域の形成方法は、Z軸に垂直な主面を有するMgLN基板の+Z面に、独立した二つの電極を形成し、それぞれの電極に電圧を印加することで、広範囲の分極反転領域を形成する方法である。特に、本実施の形態は、上記実施の形態に対して、電極の構成において特徴を有している。

本実施の形態の分極反転領域の形成方法について説明する。本実施の形態では、周期 $2\mu\text{m}$ の分極反転領域を形成する方法について述べる。

まず、図10に示すように、MgLN基板1001の主面1002には、Y軸方向に延びる複数の先端部(電極指)1005を有する第一の電極1003($2\mu\text{m}$ の間隔に配置された2本の歯(電極指)からなる組を周期 $8\mu\text{m}$ で有する櫛形電極)と、Y軸方向に延びる複数の先端部(電極指)1006を有する第二の電極1004($2\mu\text{m}$ の間隔に配置された2本の歯(電極指)からなる組を周期 $8\mu\text{m}$ で有する櫛形電極)とが形成されている。また、先端部1005および先端部1006は、同一平面内において、X軸方向(図2参照)に周期電極を形成している。具体的には、第一の電極1003の先端部1005のそれぞれの組は、第二の電極1004の先端部1006のそれぞれの組と、Y軸方向位置が重複するように、交互に配置されている。すなわち、それぞれの先端部の組は、X軸方向から見て重複するように交互に配置されている。これにより、先端部1005および先端部1006は、同一平面内において、X軸方法に周期 $2\mu\text{m}$ の周期電極を形成している。

なお、電極パターンおよび溝の形成方法は、実施の形態2と同様のであるため、説明を省略する。エッチングによる溝深さは、本実施の形態では、 $0.5\mu\text{m}$ とした。

第一の電極1003の先端部1005、および第二の電極1004の先端部1006は、結晶のY軸方向を向いている。さらに、第一の電極1003と第二の電極1004とは電氣的に絶縁されている。

また、主面1002の反対側の面に第三の電極1007を形成する。第一の電極1003または第二の電極1004と他の面に形成された第三の電極1007との間にパルスジェネレータ1008で制御した電圧を印加することで、電極間に分極反転領域が形成される。パルスジェネレータは、所定の電圧レベルを有し、必要に応じてパルス電圧または直流電圧を、MgLN基板1001に印加することができる。

ここで、電圧印加時の放電発生を避けるために、MgLN基板1001を絶縁液または真空中(10^{-6}Torr 以下)に配置して、電圧を印加する。

電圧の印加方法について具体的に説明する。

まず、第二の電極1004と第三の電極1007との間にパルス電圧を印加する。次に

、第一の電極1003と第三の電極1007との間に、同様にパルス電圧を印加する。これらにより、第一の電極1003および第二の電極1004の先端部1005および先端部1006の下に分極反転核が生じ、先端部1005と先端部1006とが配置される周期に対応して、周期 $2\mu\text{m}$ の分極反転領域が形成される。先端部1005、1006の分極反転核は、パルス電圧の印加を継続することによりY軸方向およびZ軸方向に成長する。Y軸方向において、第一の電極1003と第二の電極1004とが重複する部分全体に分極反転領域が形成されることで、広範囲の周期 $2\mu\text{m}$ の分極反転領域が形成される。

本実施の形態では、二本ずつの歯の組を交互に配置する電極形状にすることで、実施の形態2に比して、電極指先端の電界集中を良好な状態にすることができ、電極下への分極反転領域を形成することができた。一般に、周期電極間の幅が狭くなると、各電極指先端の電界の集中が緩和されてしまうことになる。一方、本発明では、それぞれの電極は、電極指を複数本毎の組として周期的に有し、2つの電極は、電極指の組を交互に配置するように形成されている。このような交差形状(ここでは2本毎の交差を形成)にすることで $2\mu\text{m}$ 以下の短周期分極反転形成においても均一かつ広範囲の形成を実現することができた。

なお、電極指の組が有する歯の本数は、2本に限らない。例えば、3、4本、およびそれ以上の本数であっても構わない。電極指の連続する本数が多いほど、対面する電極との空間Sが大きくなるため(具体的には、同じ組の電極指の最先端部と、それらの最先端部にY軸方向に対向する電極とで挟まれる空間が大きくなるため)、電極指先端に電界が集中しやすく、深さ方向、および電極指方向の分極反転領域の拡大が容易となる。

(その他)

本発明の光学素子により、分極反転領域の安定な形成保持を実現し、高温昇温等の信頼性試験に耐える高い信頼性を有する分極反転領域を備えた光学素子が提供される。

また、本発明の光学素子は、例えば、Mgをドープした結晶において、短周期分極反転構造を有し、高効率かつ安定な光波長変換素子等として利用可能である。

また、本発明の光学素子は、例えば、分極反転領域を有していて、光情報処理や光応用計測制御分野に使用されるコヒーレント光源を応用した光波長変換素子、偏光素子、光スイッチ、位相変調器、等に応用される光学素子として利用可能である。

本発明の分極反転領域の形成方法は、厚い基板において、短周期の分極反転構造を均一、安定かつ広範囲に渡り形成する有効な手段であり、例えば、短周期分極反転構造を備えた光学素子の製造方法として利用可能である。このような光学素子には、微細な分極反転領域が形成されており、紫外光発生用の光波長変換素子等の光学素子として利用可能である。

また、本発明の分極反転領域の形成方法は、設計した電極の下に、電極に沿ってできるだけ広い範囲で均一な分極反転領域を形成するために、印加電圧のパルス波形の制御を行う。具体的には、立ち上がり、立下りの速い電圧波形を印加する。これにより、本発明の方法では、その過渡的な効果を利用し、微細かつ広範囲にわたる短周期分極反転領域を均一に形成することが可能となる。

一般に、先端部を有する電極を用いてZ板の基板に分極反転を形成すると、電極先端部に電圧が集中するため、この部分の分極反転は効率良く形成される。しかし、分極反転部分が電極全体に広がりにくい傾向にある。そこで、本発明の分極反転領域の形成方法では、電圧波形、および電極構成を工夫し、電極のできるだけ広い領域に分極反転部が広がる方法を提供した。すなわち、均一かつ広範囲な短周期構造を含む微細な分極反転領域の形成には本発明の形成方法が非常に有効である。

産業上の利用可能性

- [0007] 本発明にかかる光学素子は、短周期かつ広範囲の分極反転構造を備える光学素子を提供することが求められる分野で有用である。また、本発明にかかる分極反転領域の形成方法は、短周期かつ広範囲の分極反転領域を形成する方法を提供することが求められる分野で有用である。

請求の範囲

- [1] 単一分極化された強誘電体基板と、
前記強誘電体基板に形成された複数の分極反転領域と、
前記分極反転領域の間の前記強誘電体基板の表面に形成された溝と、
を備え、
少なくとも1つの前記分極反転領域の深さ T' は、基板厚み T に対し、 $T' < T$ の関係を満たすことを特徴とする、
光学素子。
- [2] 前記 $T' < T$ の関係を満足する分極反転領域は、前記複数の分極反転領域全体の50%以上であることを特徴とする、
請求項1記載の光学素子。
- [3] 前記 $T' < T$ の関係を満足する分極反転領域は、前記複数の分極反転領域全体の90%以上であることを特徴とする、
請求項1記載の光学素子。
- [4] 前記分極反転領域の間隔は、 $5\mu\text{m}$ 以下であることを特徴とする、
請求項1記載の光学素子。
- [5] 前記分極反転領域の幅は、 $5\mu\text{m}$ 以下であることを特徴とする、
請求項1記載の光学素子。
- [6] 前記強誘電体基板の厚みは、 0.5mm 以上であることを特徴とする、
請求項1記載の光学素子。
- [7] 前記強誘電体基板は、単一分極の結晶であり、
前記分極反転領域は、前記強誘電体基板の表面内部に先端部を有し、
前記先端部の方向は、前記結晶の Y 軸方向であることを特徴とする、
請求項1記載の光学素子。
- [8] 前記溝は、前記強誘電体基板の表面から $0.5\mu\text{m}$ 以上の深さで形成されていることを特徴とする、
請求項1記載の光学素子。
- [9] 前記溝は、前記強誘電体基板の表面から $10\mu\text{m}$ 以下の深さで形成されていること

を特徴とする、

請求項7記載の光学素子。

- [10] 前記分極反転領域は、周期状の分極反転構造であることを特徴とする、

請求項1〜9のいずれか一項に記載の光学素子。

- [11] 前記強誘電体基板の法線と前記強誘電体基板の自発分極とのなす角度は、 30° 以下であり、

前記分極反転領域の周期方向と前記結晶のY軸とは、直交することを特徴とする、
請求項10記載の光学素子。

- [12] 前記強誘電体基板の法線と前記強誘電体基板の自発分極とのなす角度は、 30° 以下であり、

前記強誘電体基板の厚みTは、 $T \geq 0.5 \text{ mm}$ であり、

前記分極反転領域の周期 Λ は、 $\Lambda \leq 2 \mu \text{ m}$ であることを特徴とする、
請求項10記載の光学素子。

- [13] 前記強誘電体基板は、Mgドープの $\text{LiTa}_{(1-x)}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$)であることを特徴とする、

請求項1〜12のいずれか一項に記載の光学素子。

- [14] 単一分極化された強誘電体結晶基板の内部に分極反転領域を形成する方法において、

前記強誘電体基板の表面に溝を設け、前記強誘電体基板の表面を複数の領域に分割する工程と、

前記複数の領域に電界を印加し分極反転領域を形成する工程と、
を備え、

前記電界の方向は、前記強誘電体基板の自発分極に対向する方向であり、

前記電界を印加する工程において、前記複数の領域に電位差が生じることを特徴とする、

分極反転領域の形成方法。

- [15] 少なくとも1つの前記分極反転領域の深さT'は、基板厚みTに対し、 $T' < T$ の関係を満たすことを特徴とする、

請求項14記載の分極反転領域の形成方法。

- [16] 前記複数の領域は、周期状に隣接するよう形成され、
前記電界を印加する工程では、一定の周期を持って隣接する領域に互いに異なる電位が生じることを特徴とする、
請求項14記載の分極反転領域の形成方法。
- [17] 前記電界を印加する工程では、前記複数の領域のそれぞれに、異なる電界を印加することを特徴とする、
請求項14記載の分極反転領域の形成方法。
- [18] 前記電界を印加する工程では、前記複数の領域の何れかに、時間的に変化する電界を印加することを特徴とする、
請求項14記載の分極反転領域の形成方法。
- [19] 前記電界を印加する工程では、前記電界の変化が1kV／秒以上であることを特徴とする、
請求項18記載の分極反転領域の形成方法。
- [20] 前記溝の幅は、 $5\mu\text{m}$ 以下であることを特徴とする、
請求項14記載の分極反転領域の形成方法。
- [21] 前記複数の領域のそれぞれの幅は、 $5\mu\text{m}$ 以下であることを特徴とする、
請求項14記載の分極反転領域の形成方法。
- [22] 前記強誘電体基板の厚みは、0.5mm以上であることを特徴とする、
請求項14記載の分極反転領域の形成方法。
- [23] 前記電界を印加する工程において、正電界と負電界を交互に印加することを特徴とする、
請求項14記載の分極反転領域の形成方法。
- [24] 前記電界を印加する工程において、前記電界は、10msec以下のパルス幅を有するパルス電圧により印加されることを特徴とする、
請求項14記載の分極反転領域の形成方法。
- [25] 前記溝は、前記強誘電体基板の表面から $0.5\mu\text{m}$ 以上の深さで形成されていることを特徴とする、

請求項14記載の分極反転領域の形成方法。

- [26] 前記溝は、前記強誘電体基板の表面から $10\mu\text{m}$ 以下の深さで形成されていることを特徴とする、

請求項25記載の分極反転領域の形成方法。

- [27] 前記複数の領域は、一定の周期で交互に配置されるように形成されており、
前記分極反転領域は、前記一定の周期で形成されることを特徴とする、

請求項14記載の分極反転領域の形成方法。

- [28] 前記複数の領域のそれぞれは、所定の間隔に配置される複数の小領域からなる小領域群を有しており、

前記複数の領域は、それぞれの前記小領域群を交互に配置するように形成されており、

前記分極反転領域は、前記所定の間隔で形成されることを特徴とする、
請求項14記載の分極反転領域の形成方法。

- [29] 前記強誘電体基板は、Mgドープの $\text{LiTa}_{(1-x)}\text{Nb}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$)であることを特徴とする、

請求項14記載の分極反転領域の形成方法。

- [30] 前記強誘電体基板は、X-カット、Y-カット、またはZ-カットからなる基板であることを特徴とする、

請求項14記載の分極反転領域の形成方法。

- [31] 前記強誘電体基板の法線と前記強誘電体基板の自発分極とのなす角度は、 30° 以下であり、

前記分極反転領域は、周期状に形成され、

前記分極反転領域の周期方向と前記強誘電体基板のY軸とが直交することを特徴とする、

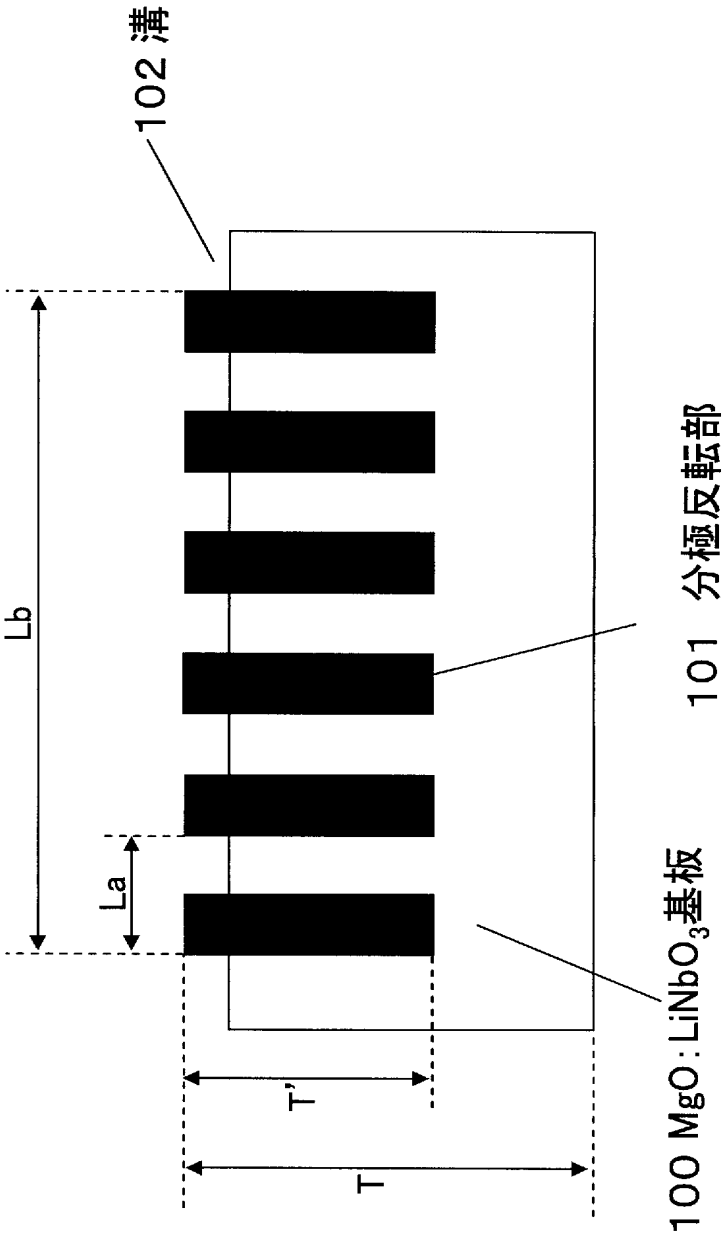
請求項14記載の分極反転領域の形成方法。

- [32] 前記強誘電体基板の厚み T は、 $T \geq 0.5\text{mm}$ であり、

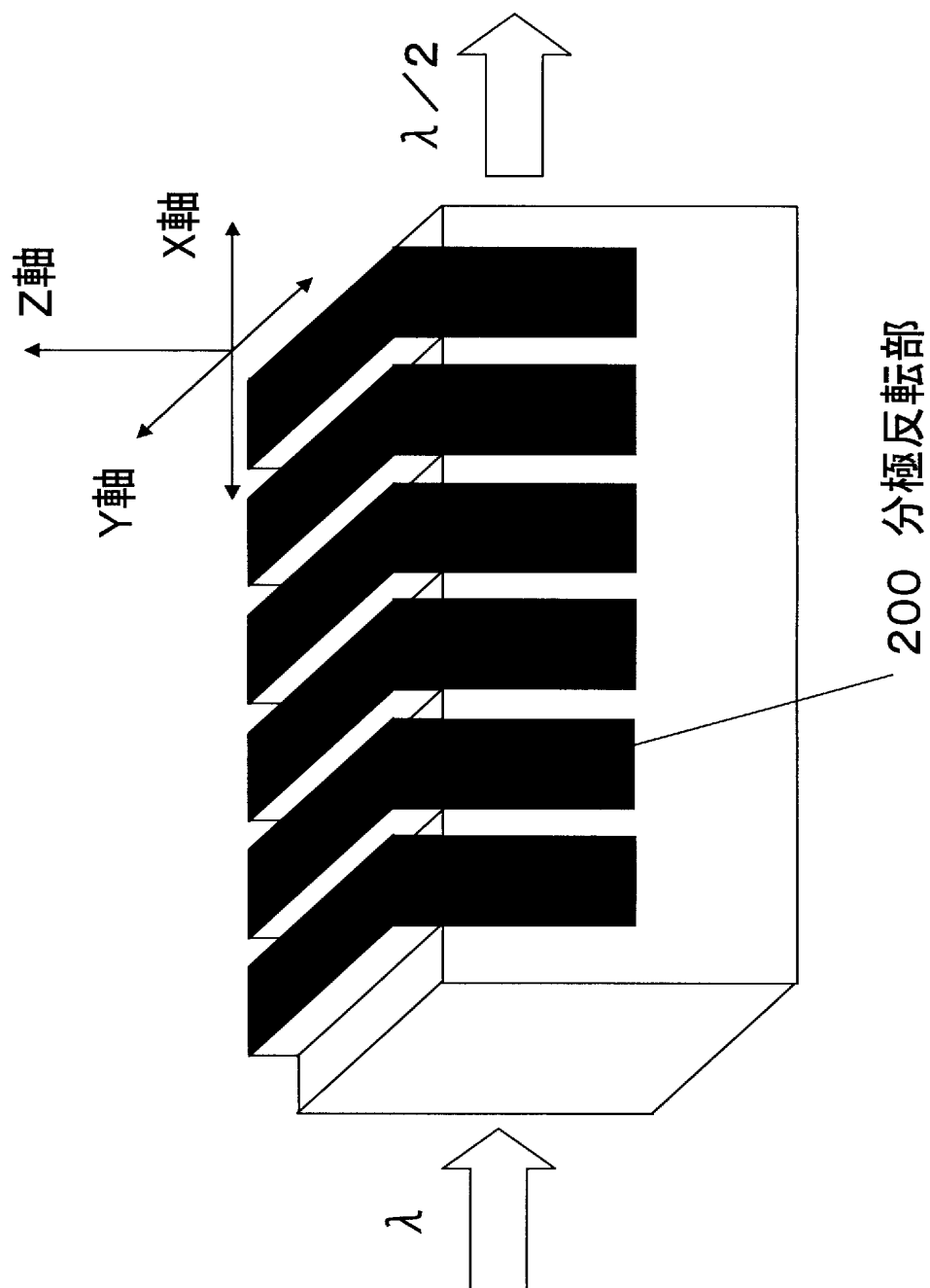
前記分極反転領域の周期 Λ は、 $\Lambda \leq 2\mu\text{m}$ であることを特徴とする、
請求項14記載の分極反転領域の形成方法。

- [33] 前記電界を印加する工程は、自発分極を P_s 、分極反転面積を A とした場合、 $2P_sA$ の100倍以上の電荷量を印加することを特徴とする、
請求項14記載の分極反転領域の形成方法。
- [34] 前記電界を印加する工程は、 80°C 以上の絶縁溶液中で行われることを特徴とする、
請求項14記載の分極反転領域の形成方法。

[図1]

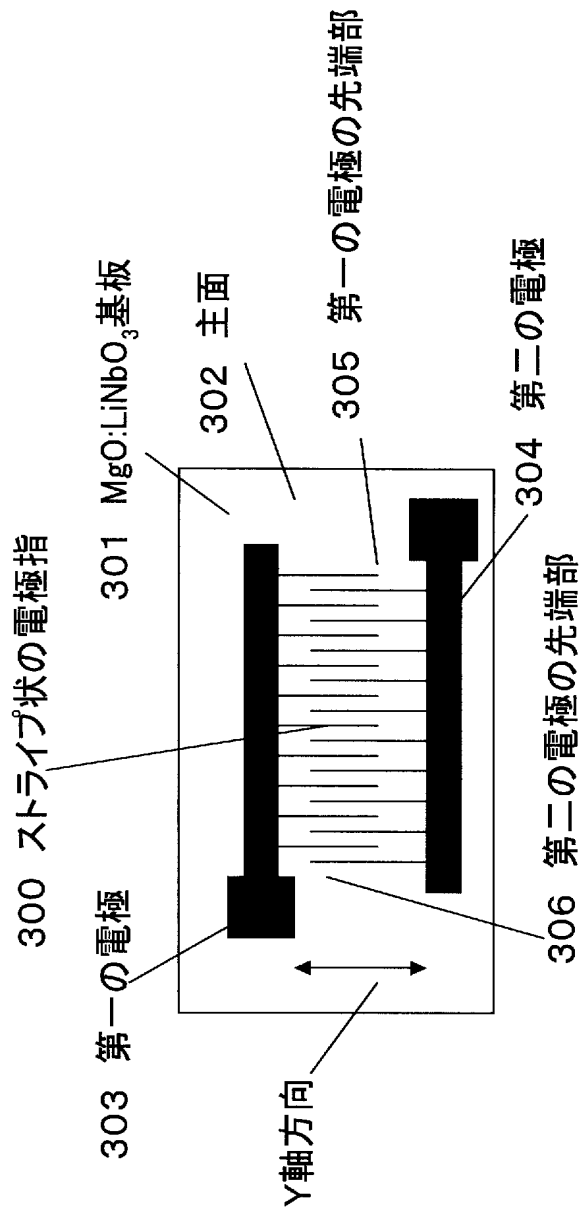


[図2]

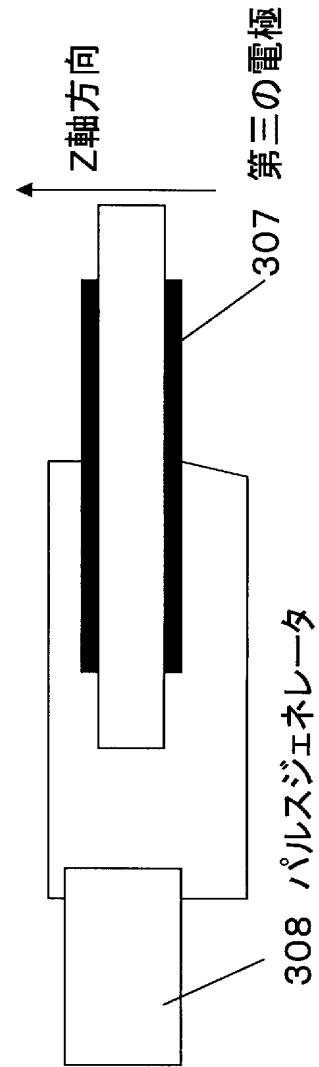


[図3]

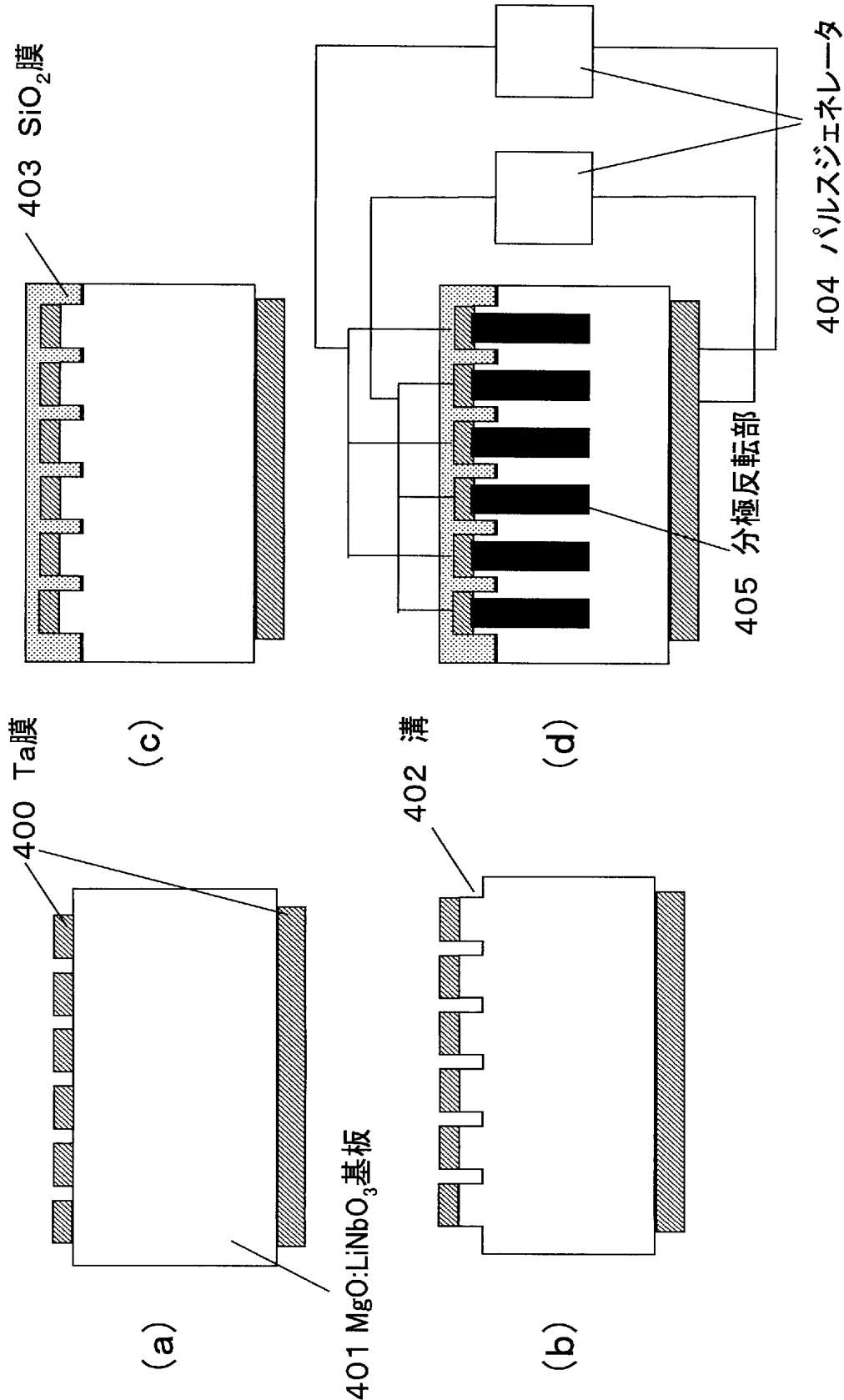
(a)上面図



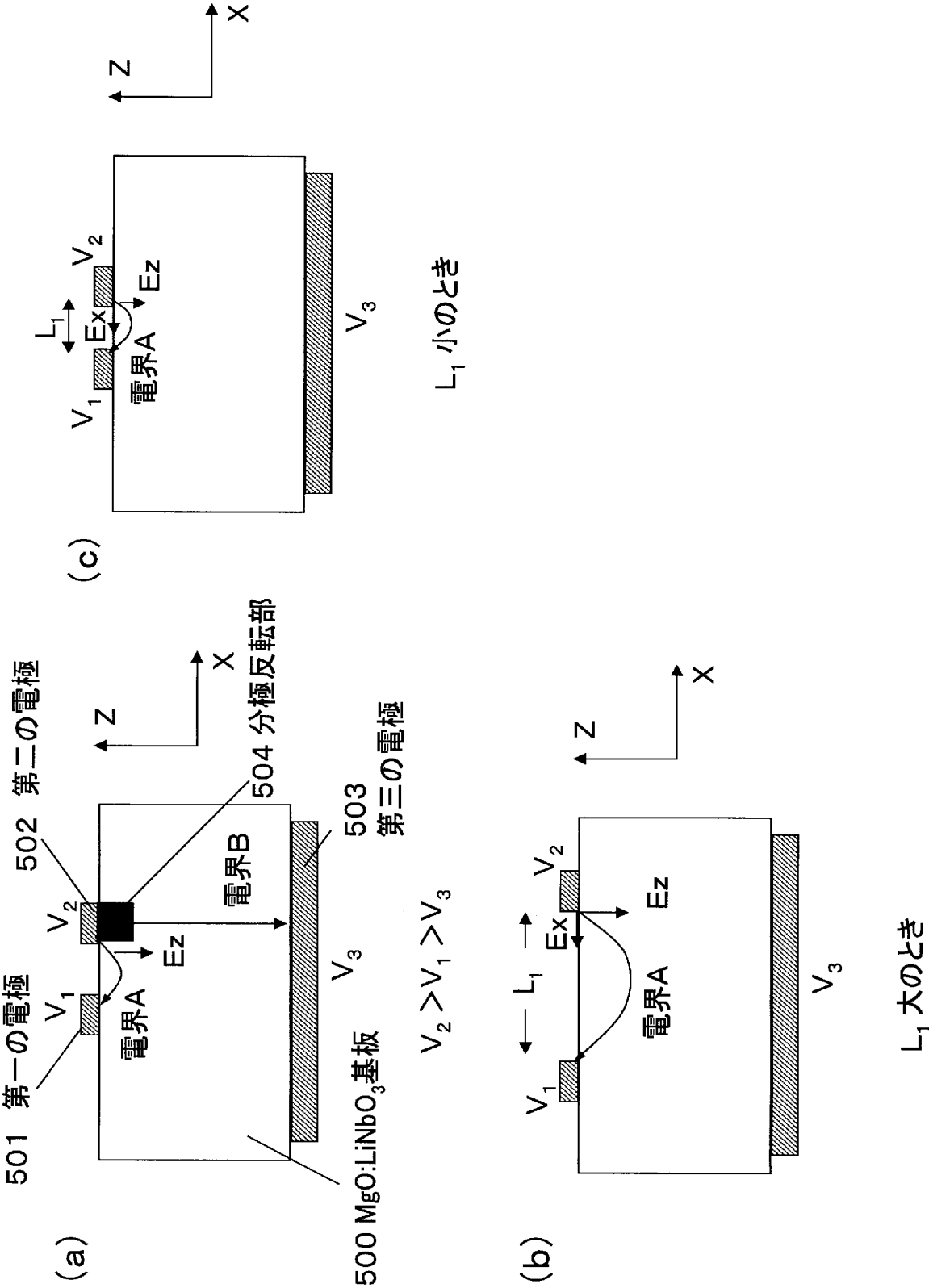
(b)側面図



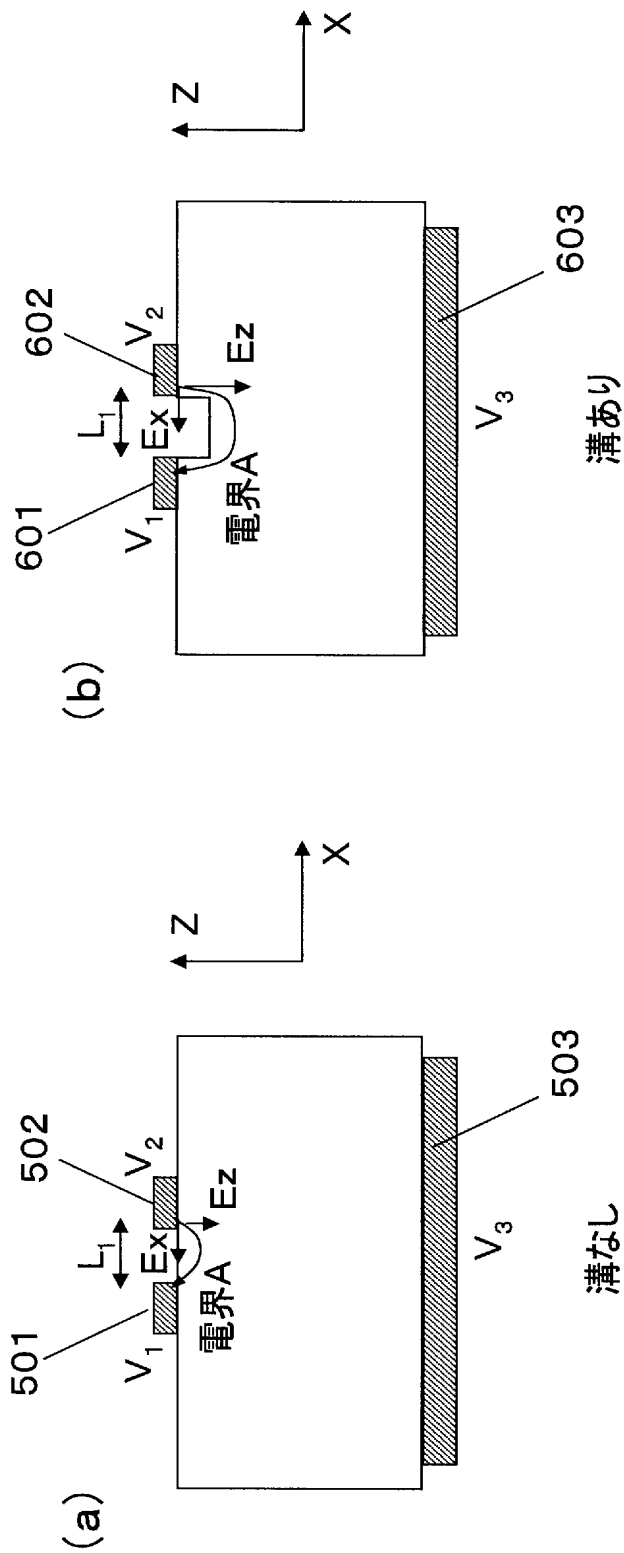
[図4]



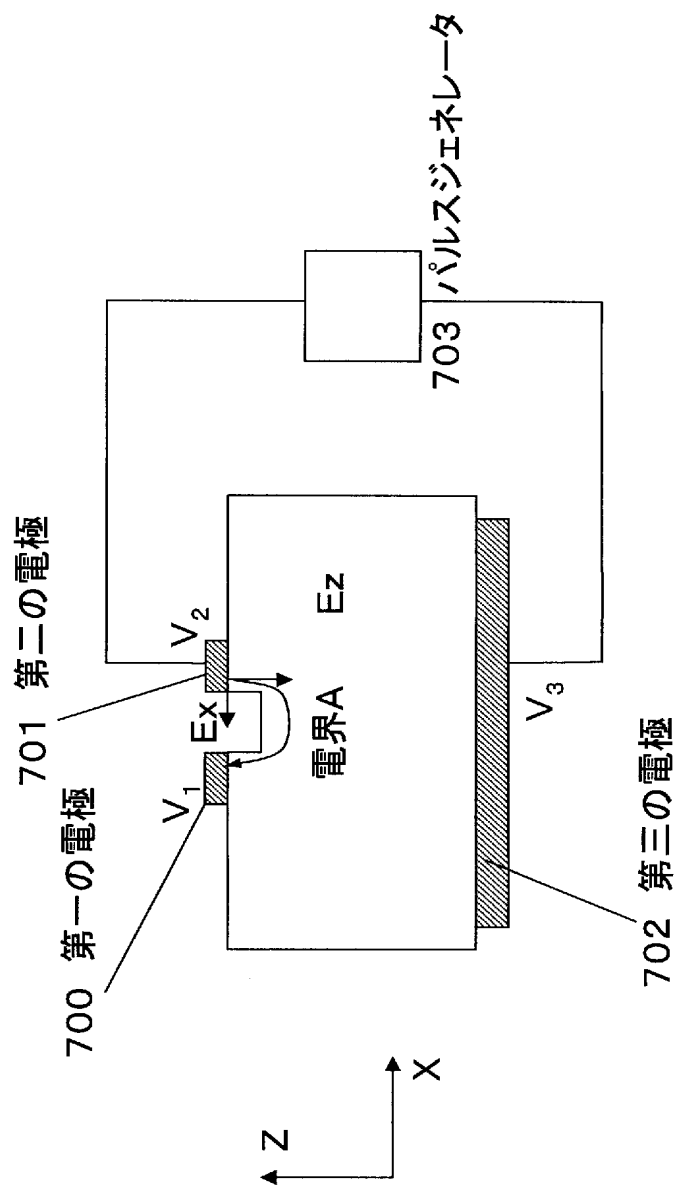
[図5]



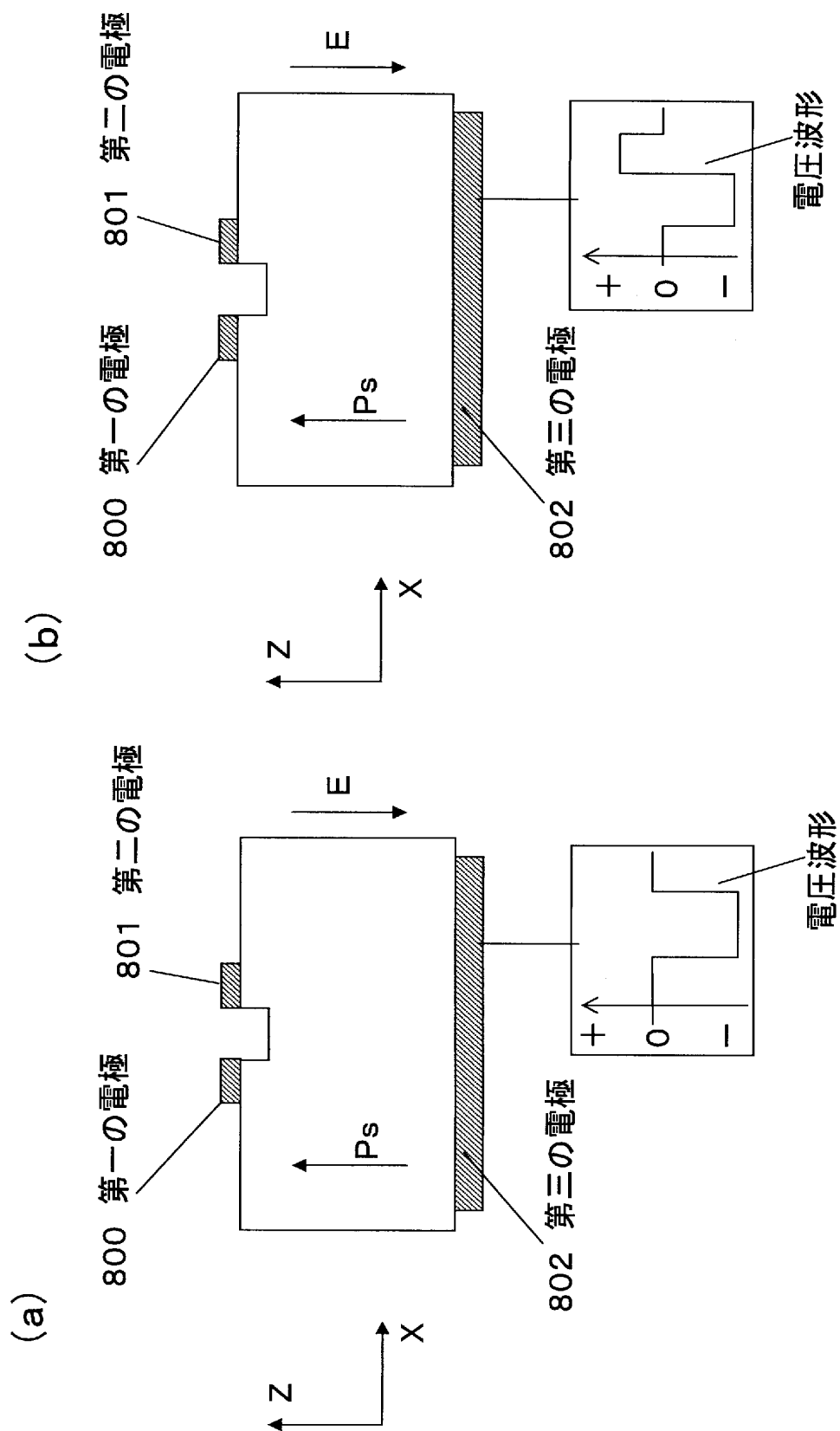
[図6]



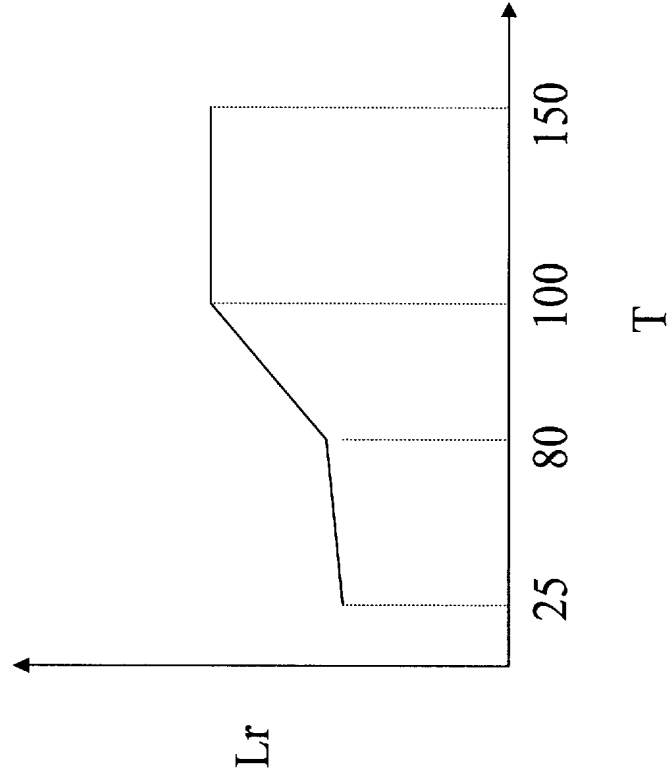
[図7]



[図8]

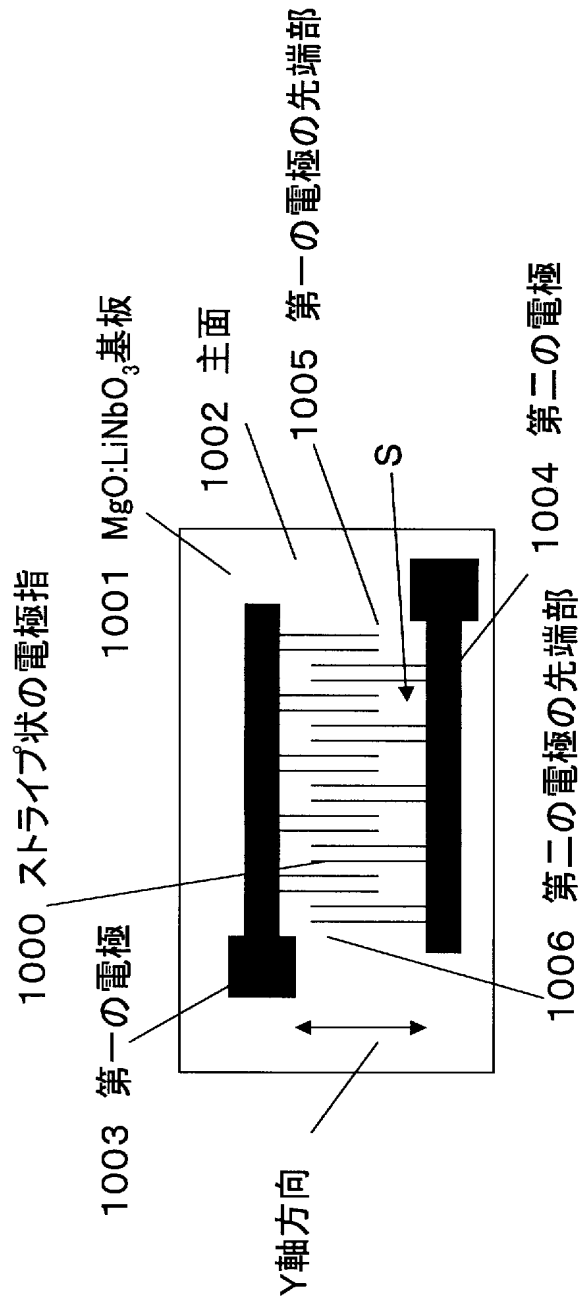


[図9]

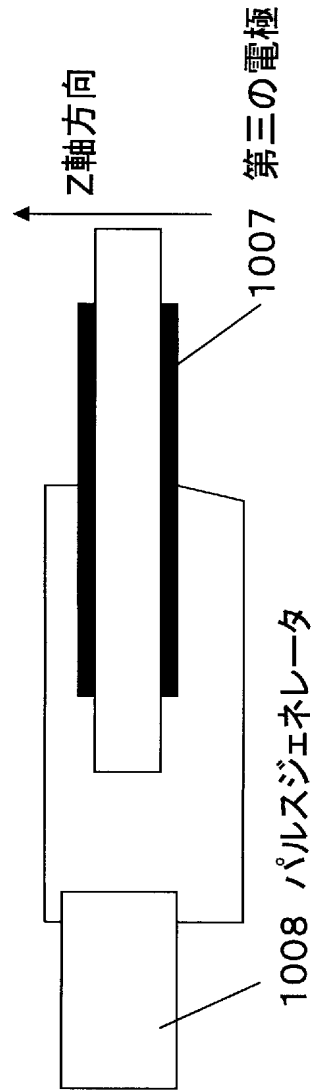


[図10]

(a)上面図



(b)側面図



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/004520

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl.⁷ G02F1/37

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl.⁷ G02F1/37

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2005
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2005	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2005

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus (JOIS)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y A	JP 2003-57697 A (NGK Insulators, Ltd.), 26 February, 2003 (26.02.03), (Family: none)	1-11, 13 12 14-34
Y A	Akihiro MORIKAWA, Tomoya SUGITA, Kiminori MIZUUCHI, Kazuhisa YAMAMOTO, "MgO:LiNbO3 eno Tanshuki Bunkyo Hanten Keisei to Kokoritsu Shigaiko Hassei", The Review of laser engineering, 15 March, 2004 (15.03.04), pages 191 to 196	12 14-34
A	JP 5-323407 A (Fujitsu Ltd.), 07 December, 1993 (07.12.93), & US 5380410 A1 & EP 532969 A2	14-34



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

03 June, 2005 (03.06.05)

Date of mailing of the international search report

28 June, 2005 (28.06.05)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/004520

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:

3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

The "special technical feature" of the invention of claim 1 is a feature related to the depths of polarization-reversed regions which are so formed in a ferroelectric substrate of an optical device that each two of the regions sandwich a groove; while the "special technical feature" of the invention of claim 14 is a feature related to an electric field applying process during the formation of polarization-reversed regions which are divided by grooves. Since there is no technical relationship between these inventions involving one or more of the same or corresponding special technical features, these inventions are not considered so linked as to form a single general inventive concept.

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☒ As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:

4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest

- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.
- ☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. ⁷ G02F1/37			
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. ⁷ G02F1/37			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> 日本国実用新案公報 日本国公開実用新案公報 日本国実用新案登録公報 日本国登録実用新案公報 </div> <div> 1922-1996年 1971-2005年 1996-2005年 1994-2005年 </div> </div>			
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語) JSTPlus (JOIS)			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号	
X	J P 2003-57697 A (日本碍子株式会社) 2003.02.26 (ファミリーなし)	1-11, 13	
Y		12	
A		14-34	
Y	森川顕洋、杉田知也、水内公典、山本和久、MgO:LiNbO ₃ への短周期分極反転形成と高効率紫外光発生、レーザ研究、2004.3.15, 第191-196頁	12	
A		14-34	
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。			
<div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;"> <p>* 引用文献のカテゴリー</p> <p>「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの</p> <p>「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの</p> <p>「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)</p> <p>「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</p> <p>「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願</p> </div> <div style="flex: 1;"> <p>の日の後に公表された文献</p> <p>「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの</p> <p>「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの</p> <p>「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの</p> <p>「&」 同一パテントファミリー文献</p> </div> </div>			
国際調査を完了した日 03.06.2005		国際調査報告の発送日 <div style="font-size: 1.2em; font-weight: bold;">28.06.2005</div>	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> 特許庁審査官 (権限のある職員) 佐藤 宙子 電話番号 03-3581-1101 内線 3294 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> 2X 9316 </div> </div> </div>	

C (続き) . 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	J P 5-323407 A (富士通株式会社) 1993.12.07 & US 5380410 A1 & EP 532969 A2	14-34

第Ⅱ欄 請求の範囲の一部の調査ができないときの意見（第1ページの2の続き）

法第8条第3項（PCT17条(2)(a)）の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。

1. ☐ 請求の範囲 _____ は、この国際調査機関が調査をすることを要しない対象に係るものである。つまり、
2. ☐ 請求の範囲 _____ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、
3. ☐ 請求の範囲 _____ は、従属請求の範囲であってPCT規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。

第Ⅲ欄 発明の単一性が欠如しているときの意見（第1ページの3の続き）

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるところの国際調査機関は認めた。

請求の範囲1に係る発明の「格別な技術的特徴」とは、光学素子が備える強誘電体基板に、溝を挟んで形成された複数の分極反転領域の深さに関する事項であり、一方、請求の範囲14に係る発明の「格別な技術的特徴」とは、溝で分割される複数の分極反転領域の形成における電界印加工程に関する事項である。これらの発明は、一又は二以上の同一又は対応する特別な技術的特徴を含む技術的な関係にないから、単一の一般的発明概念を形成するように連関しているものとは認められない。

1. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求の範囲について作成した。
2. ☒ 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求の範囲について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求の範囲のみについて作成した。
4. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求の範囲について作成した。

追加調査手数料の異議の申立てに関する注意

☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあった。

☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがなかった。